

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.05.026

# 基于鱼群算法的 UPFC 定容研究

赵 丽<sup>1</sup>, 邱成龙<sup>2</sup>, 郑连清<sup>1</sup>

(1. 兵团兴新职业技术学院 机电工程系, 新疆 乌鲁木齐 830074;  
2. 国网青岛供电公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:**针对统一潮流控制器(UPFC)的容量正确选择问题,介绍了一种由 UPFC 安装的收益和成本函数确定其容量的方法,提出了利用一种较新的智能算法—鱼群算法以寻找最优补偿电压(标么值),进行 UPFC 安装容量的寻优,从而确定 UPFC 的容量。为了比较鱼群算法的寻优特点,利用遗传算法与其进行了比较。最后以 IEEE 14 节点系统为算例,通过鱼群算法对目标函数进行了寻优,经过 Matlab 仿真,得到了收益与 UPFC 串联侧注入电压幅值的关系曲线及其迭代过程情况。经过分析,算例结果表明,鱼群算法具有克服局部极值、取得全局极值的能力;该算法中仅使用目标问题的函数值,对搜索空间有一定的自适应能力;其具有对初值与参数选择不敏感、鲁棒性强、简单易实现、收敛速度快等优点。

**关键词:**统一潮流控制器;容量;鱼群算法;遗传算法

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)05-0717-06

## Study on capacity of UPFC based on artificial fish swarm algorithm

ZHAO Li<sup>1</sup>, QIU Cheng-long<sup>2</sup>, ZHEN Lian-qing<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanical & Electrical Engineering, Xingxin Vocational and Technical College of the Xinjiang Production and Construction Corps, Wulumuqi 830074, China;  
2. Qingdao Power Supply Company of State Grid, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** Aiming at the correct selection of the capacity of unified power flow controller (UPFC), the method of determination of the capacity of UPFC installed by the cost and profit functions was introduced. The installed capacity of UPFC using a new intelligent algorithm-artificial fish swarm algorithm was presented to find the optimal compensation voltage (p. u.) and determine the UPFC capacity. In order to compare the algorithm's optimization, the genetic algorithm was compared with the artificial fish swarm algorithm. Finally, taking IEEE 14 node system for example, the method was used to find the optimal size of UPFC. Through Matlab simulation the relationship curve between income and UPFC series injected voltage amplitude was got. After the analysis, the calculation results show that the algorithm has ability to overcome the local extremum and achieve global extremum; only using the values in the algorithm, there is a certain adaptive ability of the search space; initial value to the parameter selection is insensitivity, strong robustness, simple and easy to implement, fast convergence speed.

**Key words:** unified power flow controller(UPFC); capacity; artificial fish swarm algorithm; genetic algorithm

## 0 引 言

统一潮流控制器(UPFC)能够提高线路传输功率的能力、对系统的潮流控制方式灵活可靠、增强系统的阻尼和稳定性,但对整个系统而言,UPFC 容量的大小

涉及制造安装成本和经济收益问题。因此,如何确定 UPFC 在所安装位置的容量是工程应用上要解决的关键问题。

文献[1-2]采用一种 UPFC 的功率注入模型,以系统过负荷能力、装设 UPFC 和燃料成本为目标,利用线

路潮流对 UPFC 控制参数的灵敏度找到最优安装位置和容量。文献[3-4]以 FACTS 设备成本最小和系统的稳定性作为目标函数,利用多目标遗传算法对目标函数寻优,从而对 FACTS 器件的最佳安装容量和位置进行选择。文献[5]在电力系统正常和重负荷情况下,将 UPFC 安装在线路的过负荷和节点电压越限处,采用迭代方法确定线路有功和无功潮流。文献[6]采用粒子群和遗传算法以假定故障下的电力系统最大静态安全水平为目标,确定 UPFC 的安装位置和容量。文献[7]通过搭建含有 UPFC 的最优负荷消减模型,引用其功率注入模型,在 UPFC 不等式约束中,利用控制参数的拉格朗日乘子,获得系统电量不足的期望对 UPFC 容量的灵敏度表达式,由灵敏度值的大小确定 UPFC 最优安装位置,并利用收益和成本确定容量。文献[8]基于结构保留模型,引入拓扑能量函数理论,对系统中暂态势能分布及变化特点进行推导分析,通过对评价割集稳定的量化指标分析选择 FACTS 的最佳安装位置和容量。以上文献中,大多只是对 UPFC 的选址方法进行了详细的研究,但对 UPFC 安装容量的寻优较少使用智能算法。

本研究介绍一种由 UPFC 安装的收益和成本函数确定其容量的方法,利用一种较新的智能算法—鱼群算法进行 UPFC 安装容量的寻优,并以 IEEE 14 节点系统为算例,利用该方法分析 UPFC 的最佳容量大小。

## 1 UPFC 定容方法

在电力市场中,输电能力和经济效益密切相关,安装 UPFC 的容量大小也决定了系统提高输电能力的程度和设备的投资成本。如何确定其为系统带来最大经济效益的容量是接下来要解决的问题。

### 1.1 UPFC 的定容等值电路

在稳态情况下,UPFC 可以表示成等效电压源,忽略线路的对地电容和电阻,UPFC 定容等值电路如图 1 所示。

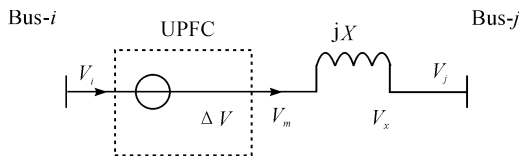


图 1 UPFC 定容等值电路

UPFC 稳态运行的向量图如图 2 所示。

若输电电路中没有安装 UPFC 时,线路上流过的有功潮流为:

$$P_o = \frac{V_i \cdot V_j}{X} \sin\theta \quad (1)$$

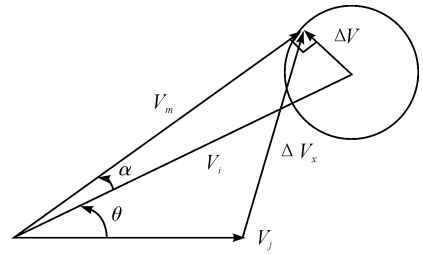


图 2 UPFC 稳态运行相连图

若线路中安装有 UPFC,  $\alpha$  为  $V_m$  和  $V_i$  的夹角,当  $\alpha$  最大时,即  $\Delta V$  与  $V_m$  垂直时,使得线路潮流最大,此时流过的有功功率为:

$$P_u = \frac{V_m \cdot V_j}{X} \sin(\theta + \alpha) \quad (2)$$

又因为  $\sin\alpha = \Delta V/V_i$ ,  $\cos\alpha = V_m/V_i \approx 1$ , 则因为安装了 UPFC, 线路上增加有功潮流为:

$$\Delta P = P_u - P_o = \frac{V_i \times V_j}{X} \left( \cos\theta \frac{\Delta V}{V_i} - \sin\theta \frac{\Delta V^2}{V_i^2} \right) \quad (3)$$

从 UPFC 的等值电路上可知:  $V_m = V_j + \Delta V_x$ , 则由余弦定理得:

$$\Delta V_x = \sqrt{V_m^2 + V_j^2 - 2V_j V_m \cos(\alpha + \theta)} \approx \sqrt{|V_i^2 - \Delta V^2 + V_j^2 - 2V_j(V_i \cos\theta - \Delta V \sin\theta)|} \quad (4)$$

因为  $I_x = \Delta V_x/X$ , UPFC 的运行容量为:

$$S = I_x \cdot \Delta V = \Delta V \cdot \frac{\sqrt{|V_i^2 - \Delta V^2 + V_j^2 - 2V_j(V_i \cos\theta - \Delta V \sin\theta)|}}{x} \quad (5)$$

### 1.2 UPFC 投资费用与收益的函数

UPFC 投资费用函数表达式为<sup>[9]</sup>:

$$C_1 = 1000C' \times S \quad (6)$$

式中:  $S$ —UPFC 的容量, MVA;  $C'$ —单位容量 UPFC 的投资费用, 计算公式为:

$$C' = 0.0003S^2 - 0.2691S + 188.22 (\$/KVA) \quad (7)$$

本研究根据电力系统中输电能力提高所带来收益原则, 建立收益函数  $C_2$  为:

$$C_2 = C_{2a} + C_{2b} \quad (8)$$

式中:  $C_{2a}$ —输电能力提高而带来的收入, 其值与在不同电价下每年的收益和增加有功功率有关。  $C_{2a}$  表达式为:

$$C_{2a} = t(p) \Delta P (\$/year) \quad (9)$$

式中:  $t(p)$ —与电价相关的系数;  $\Delta P$ —安装 UPFC 后增加的输电能力;  $C_{2b}$ —由于安装了 UPFC 而避免架设新的输电线路和系统所带来的收益, 其表达式为:

$$C_{2b} = r \cdot C_L (\$/year) \quad (10)$$

式中: $r$ —电力工业的投资回收率, $C_L$ —投资建设新的输电线路的费用,是电网设计者在根据实际情况选择不安装 FACTS 设备时,为满足系统输电能力需求所新建输电线路的费用,本研究给出了不同电压等级所对应的不同线路长度的一次性投资费用<sup>[10]</sup>。

由公式(9,10)可知收益函数  $C_2$  的单位是 \$/year,而投资费用函数  $C_1$  的单位是 \$,两者单位不同,所以要对  $C_1$  进行转换:

$$C'_1 = \delta \cdot C_1 \quad (11)$$

$$\delta = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (12)$$

式中: $n$ —UPFC 的使用年限; $\delta$ —单位转换关系; $C_1$  经过上式转换后与  $C_2$  单位一致。

综上所述,UPFC 的最优容量数学关系如下:

$$C_{total} = C_2 - C'_1 \quad (13)$$

式中: $C_{total}$ —UPFC 的总收益,只需确定  $C_{total}$  最大时的 UPFC 的容量。这就需要对目标函数进行寻优,寻优将采用一种智能算法—鱼群算法。接下来对鱼群算法的原理和基本流程进行分析和描述。

## 2 鱼群算法寻优

人工鱼群算法是由李晓磊博士于 2002 年提出的一种基于鱼类群体行为的智能优化算法。鱼群算法具有并行性、简单性、能快速跳出局部极值、寻优速度快的特点。

### 2.1 基本原理

人工鱼对外界的感知是靠视觉实现的,虚拟人工鱼的视觉如图 3 所示。若状态  $X_v$  位置的目标值优于当前值,则考虑向该位置方向前进,即到达状态  $X_{next}$ ;若状态  $X_v$  的目标值小于当前值,则在视野内继

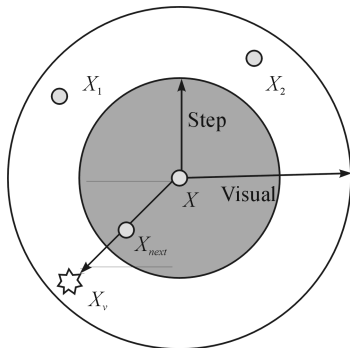


图3 人工鱼视觉的概念

$X$ —一条虚拟人工鱼当前状态, $Visual$ —其视野范围,状态  $X_v$ —其某时刻视点所在的位置

续巡视其他位置<sup>[10]</sup>。随着巡视次数的增加,也更加熟悉视野内其他人工鱼的状态,通过对周围环境的影响因素做出全面的判断,制定出适合的策略。当然某些情况下,人工鱼能够进行一定的不确定性的局部寻优,从而增加寻找到全局最优的概率<sup>[11-12]</sup>。

其中,状态  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,状态  $X_v = (x_{1v}, x_{2v}, \dots, x_{nv})$ ,则该过程可以表示如下:

$$X_v = X + Visual \cdot Rand()$$

$$X_{next} = X + \frac{X_v - X}{\|X_v - X\|} \cdot Step \cdot Rand()$$

式中: $Rand()$ —随机产生 0 ~ 1 之间的一个数值; $Step$ —移动步长。

由于人工鱼可以在视野中感知同伴(如图 3 中  $X_1, X_2$  等)的状态,系统能够根据感应到的信息调整自身状态,方法与上式类似<sup>[10]</sup>。

本研究通过模拟鱼类的 4 种行为—觅食行为、聚群行为、追尾行为和随机行为,来模拟鱼类在周围环境的活动情况<sup>[12]</sup>。

人工鱼群算法包含了变量和函数两部分。变量部分包括人工鱼的总数  $N$ 、人工鱼个体的状态  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  [其中  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$  为欲寻优的变量]、人工鱼移动的最大步长  $Step$ 、人工鱼的视野  $Visual$ 、尝试次数  $Try\_number$ 、拥挤度因子  $\delta$ 、人工鱼个体  $i, j$  之间的距离  $d_{ij} = |X_i - X_j|$ 。函数部分包括人工鱼当前所在位置的食物浓度  $Y = f(X)$  ( $Y$  为目标函数值)、人工鱼的各种行为函数(觅食行为  $Prey$ 、聚群行为  $Swarm$ 、追尾行为  $Follow$ 、随机行为  $Move$ )。通过这种封装,人工鱼的状态可以被其他同伴所感知。

### 2.2 鱼群算法流程

在人工鱼群算法中,觅食行为是算法收敛的基础,而算法收敛的稳定性通过聚群行为进一步加强,算法收敛的速度和全局性又通过追尾行为增强,这些特性为鱼群算法寻优提供了优势。人工鱼群算法的步骤如下:

(1)首先初始化算法的参数,包括人工鱼群数  $N$ 、每条人工鱼的初始位置、人工鱼移动的最大步长  $Step$ 、人工鱼的视野  $Visual$ 、重试次数  $Try\_number$  和拥挤度因子  $\delta$ 。

(2)计算每条人工鱼的目标值,并记录全局最优的人工鱼的状态。

(3)对每条人工鱼状态进行评价,对其要执行的行为进行选择,包括觅食行为、聚群行为、追尾行为和随机行为。

(4)执行人工鱼选择的行为,更新每条人工鱼的

位置信息。

(5)更新全局最优人工鱼的状态。

(6)若满足循环结束的条件,则输出结果,否则跳转到步骤(2)。

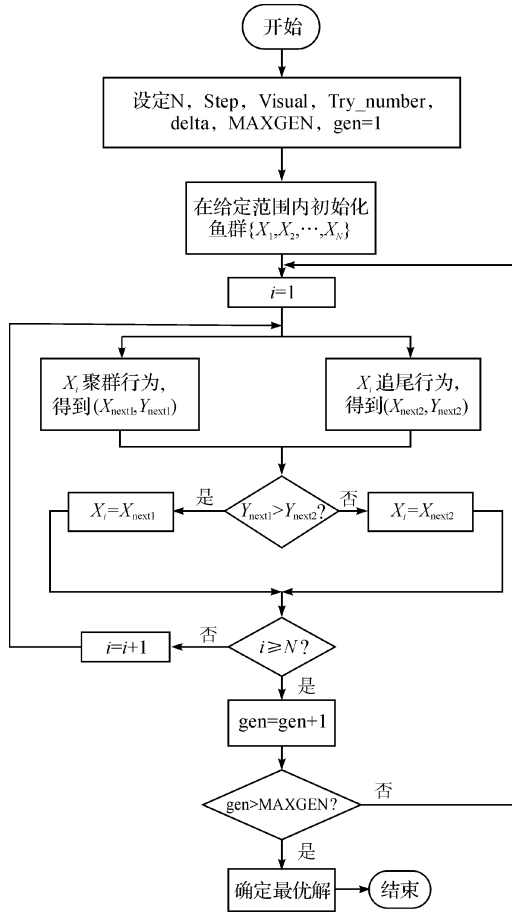


图 4 人工鱼群算法流程图

### 3 仿真及结果分析

本研究以 IEEE 14 节点系统为例装设一台 UPFC, 该系统中有 5 台发电机, 14 个节点, 已应用于很多研究中, 将基于上述理论分析 UPFC 的安装位置。

假设在 IEEE 14 节点中支路 9-10 为 UPFC 的最优安装位置。  $V_9 = 1.0563$ ,  $V_{10} = 1.0513$ ,  $\theta = \theta_9 - \theta_{10} = 0.1577^\circ$ , 支路电抗  $X_{9-10} = 0.0845$ 。这里取系统基准电压为 100 kV, 基准功率为 100 MVA。假设  $r = 1.4$ , UPFC 的使用年限  $n = 30$ , 则  $\delta = 0.10608$ 。假设由于安装 UPFC 而无需新建一条长 200 km 的新输电线,  $C_L = 20$ ,  $t(p) = 0.176$ 。

在支路 9-10 安装 UPFC 后的收益为:

$$C_2 = t(p) \cdot \Delta P \cdot S_B + rC_L = -0.5706\Delta V^2 + 218.97\Delta V + 28 \quad (14)$$

UPFC 的投资费用为:

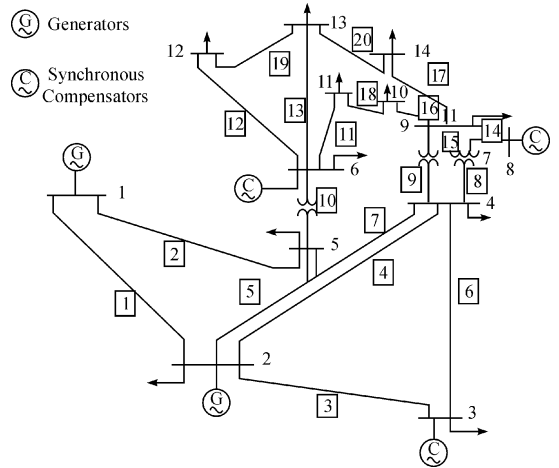


图 5 IEEE14 节点系统模型

$$C'_1 = 1000\alpha C' \cdot S = 0.0318\Delta V^3 (0.00468 - 140.05 \cdot \Delta V^2 + 0.81\Delta V^{3/2}) - 46.87\Delta V^2 (0.00468 - 140.05\Delta V^2 + 0.81\Delta V) + 12.38\Delta V (0.00468 - 140.05\Delta V^2 + 0.81 \cdot \Delta V)^{1/2} \quad (15)$$

下面将通过鱼群算法对上述目标函数寻优, 寻优参数设置为: fishnum(人工鱼群数) = 40、MAXGEN(最大迭代次数) = 50、try\_number(最大试探次数) = 100、visual(感知距离) = 1、delta(拥挤度因子) = 0.618、step(移动步长) = 0.1。

经过 Matlab 仿真而得的收益  $C_{total}$  与 UPFC 串联侧注入电压幅值  $\Delta V$  的关系曲线如图 6 所示。其迭代过程如图 7 所示。

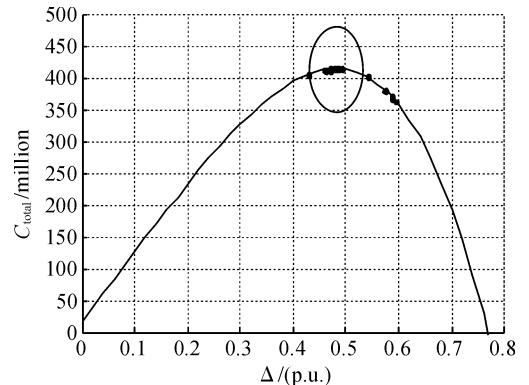


图 6 鱼群算法收益与 ΔV 寻优图

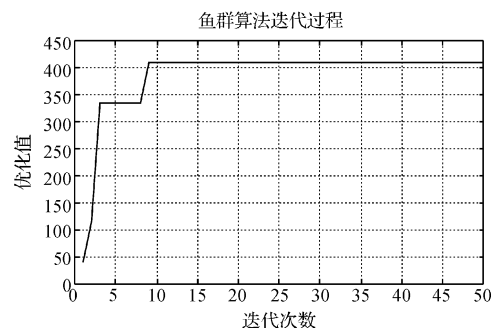


图 7 鱼群算法迭代过程



图6中,圈图部分表示迭代过程中寻找到的最优坐标的移动情况,点的颜色越深说明每次迭代的最优点越集中,所以颜色越深的区域就是寻找到的全局极值的位置,从图6中可以看出颜色最深的地方即寻找到的最优值为415.8/million \$。本次鱼群算法的迭代过程如图7所示,从图7中可以看出在迭代9次时找到全局极值,寻优速度较快。

为了对比鱼群算法寻优的特点,本研究对同一目标函数利用遗传算法进行寻优对比,遗传算法参数设置为:NIND(种群数量)=40、MAXGEN(最大遗传代数)=50、PRECI(个体长度)=20、GGAP(代沟)=0.95、 $p_x$ (交叉概率)=0.7、 $p_m$ (变异概率)=0.01。

经过Matlab仿真得收益 $C_{total}$ 与UPFC串联侧注入电压幅值 $\Delta V$ 的关系曲线如图8所示。其迭代过程如图9所示。

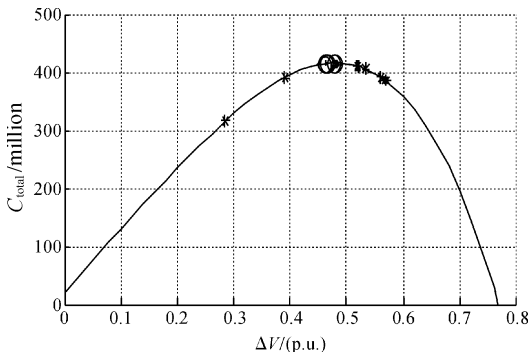


图8 遗传算法收益与 $\Delta V$ 寻优图

○—每代的最优解,\*—优化50代后的种群分布

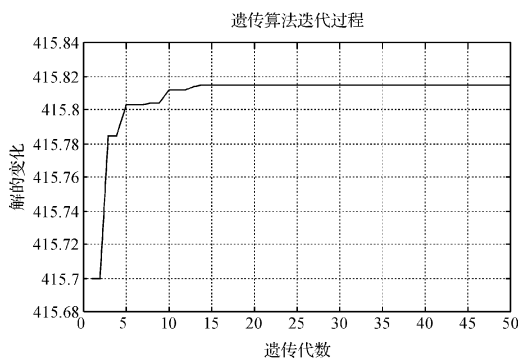


图9 遗传算法迭代过程

从图8中可以看出,○和\*大部分集中在一个点,该点即为最优解,大小为415.8/million \$。该次遗传算法的迭代过程如图9所示。从图9中可以看出在迭

代14次时找到全局极值。

为了比较两种算法的寻优,鱼群算法和遗传算法的种群规模都为40,迭代次数都为50次。图6与图8对比,鱼群算法中每代的最优解和种群分布都比较集中,能够更好地寻找到全局极值点,图7与图9对比,鱼群算法寻找到极值点的迭代次数明显少于遗传算法,收敛速度较快,能够跳出局部极值。

设UPFC串联侧逆变器采用SPWM控制,则串联侧交流电压与直流电容电压的幅值关系为:

$$U_1 = m_1 U_{dc} \quad (16)$$

式中: $m_1$ —逆变器的脉宽调制比,一般情况下 $0 \leq m_1 \leq 0.8$ 。所以,理想情况下 $0 \leq \Delta V \leq 0.8$ 。从图6可知,当 $\Delta V = 0.47$ 时,系统的收益最大。此时,由式(5)可算得UPFC的最优容量为259.8 MVA。

## 4 结束语

本研究在经济上以收益最大化为目标,利用鱼群算法寻找最优补偿电压(标么值),从而确定UPFC的容量。最后将上述方法用于IEEE 14节点系统中,来确定UPFC的安装位置和容量大小。算例结果表明,鱼群算法具有克服局部极值、取得全局极值的能力;该算法中仅使用目标问题的函数值,对搜索空间有一定的自适应能力;具有对初值与参数选择不敏感、鲁棒性强、简单易实现、收敛速度快等优点。上述算例也表明了该方法的简便实用性与正确可行性。

## 参考文献(References):

- [1] FANG W L, NGAN H W. Optimising location of unified power flow controllers using the method of augmented Lagrange multipliers[J]. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, 1999, 146(5): 428-434.
- [2] SEUNGWON A, CONDREN J, GEDRA T W. An ideal transformer UPFC model, OPF first-order sensitivities, and application to screening for optimal UPFC locations[J]. *IEEE Transactions On Power Systems*, 2007, 22(1): 68-75.
- [3] 刘红文,张葛翔. 基于改进量子遗传算法的电力系统无功优化[J]. *电网技术*, 2008, 32(12): 35-39.

(下转第738页)

## 本文引用格式:

赵丽,邱成龙,郑连清. 基于鱼群算法的UPFC定容研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(5): 717-721, 738.

ZHAO Li, QIU Cheng-long, ZHEN Lian-qing. Study on capacity of UPFC based on artificial fish swarm algorithm[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(5): 717-721, 738.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>